

ки и режимов работы фильтров, служат надежной базой не только для расчетов важнейших физико-химических характеристик, оценки значимости разнообразных факторов, но и для последующего развития исследований в этом направлении.

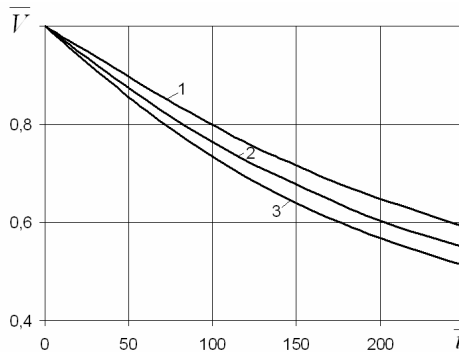


Рис. 2 – Изменение расхода фильтрата со временем (линейная кинетика):
1, 2 – $\theta = 0,5$; 3 – $\theta = 0$; 1 – $q = 2$; 2 – $q = 4$.

Нелинейность фильтрации при осветлении суспензии способна оказать заметное влияние на производительность фильтровальных установок (скорох и сверхскорох фильтров), и поэтому нуждается во всестороннем изучении.

1. Олейник А.Я., Тугай А.М. Моделирование процессов кольматажа и суффозии в прифильтровой зоне скважины // Доповіді НАН України. – 2001. – №9. – С.190-194.

2. Киселев С.К. Фильтрация загрязненных вод через пористые среды // Сучасні проблеми теорії фільтрації: Вісник Укр. держ. акад. водн. госп. – Рівне, 1998. – С.78-82.

3. Тугай А.М. Теоретические исследования регенерации фильтров, закольматированных соединениями железа // Науковий вісник будівництва. Вип.18. – Харків: ХДТУ-БА, 2002. – С.249-257.

4. Жужиков В.А. Фильтрация. Теория и практика разделения суспензий. – М.: Химия, 1980. – 400 с.

Получено 05.11.2006

УДК 628.16.067 : 542.67

П.А.ГРАБОВСКИЙ, д-р техн. наук, Н.А.ГУРИНЧИК

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФИЛЬТРОВАНИЯ ВОДЫ ЧЕРЕЗ ЗЕРНИСТЫЙ СЛОЙ С УБЫВАЮЩЕЙ СКОРОСТЬЮ

Приводится математическая модель скорого водоочистного фильтра, работающего с убывающей скоростью, и алгоритм численной реализации модели с помощью ПЭВМ.

Фильтрация через зернистый слой – один из самых важных технологических процессов, используемых в хозяйственно-питьевом и промышленном водоснабжении. От работы фильтров во многом зависит качество питьевой воды, а также стоимость очистки. Наиболее распространенные режимы работы скорых водоочистных фильтров: фильтрация с постоянной скоростью и фильтрация с убывающей скоростью.

Для обеспечения первого режима используется один из двух вариантов:

- фильтры оборудуют регуляторами скорости фильтрации, устанавливаемыми, как правило, на выходе из каждого фильтра (рис.1, а);
- воду в фильтр подают с разрывом потока (рис.1, б). В этом случае подаваемый расход не зависит от сопротивления загрузки и потому остается постоянным до тех пор, пока уровень воды в фильтре не достигнет кромки перелива. Естественно, при постоянной подаче будет и постоянная скорость фильтрации.

В первом варианте необходим регулятор с блоком управления, связанным с расходомером. В начале процесса фильтрации регулятор прикрыт и, по мере увеличения сопротивления загрузки, постепенно открывается. Во втором варианте регулятор не нужен, поскольку рост потерь напора в компенсируется подъемом уровня воды в фильтре. Однако здесь необходим фильтр большей высоты. Ясно, что оба варианта требуют дополнительных капиталовложений, а при невысоком качестве регуляторов снижается надежность работы фильтров. Поэтому подавляющее большинство станций очистки воды в странах СНГ работают без регулирования скорости фильтрации. В этом режиме по мере увеличения потерь напора в загрузке растет уровень воды в фильтре, из-за чего снижается подача воды и постепенно падает скорость фильтрации. Следует отметить, что скорые фильтры, работающие в блоке, гидравлически взаимосвязаны. Поэтому фильтры с более чистой загрузкой (которые были промыты недавно) автоматически получают большую нагрузку, чем «грязные» фильтры, т.е. происходит саморегулирование работы фильтров.

К недостаткам работы фильтров с падающей скоростью авторы [1] относят возможное ухудшение качества фильтрата, особенно в начале цикла, когда скорости фильтрации максимальны. По-видимому, такой эффект может иметь место, если начальная скорость фильтрации слишком высока. В специально поставленных опытах других авторов [2-4] было установлено, что при падающей скорости качество

фильтрата не хуже, а во многих случаях даже лучше, чем при постоянной производительности.

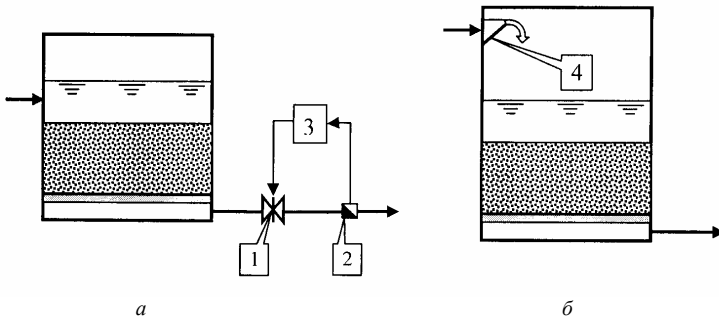


Рис.1 – Схемы фильтров с постоянной скоростью:

а – с регулятором скорости фильтрования; б – с разрывом потока;

1 – регулятор производительности; 2 – расходомер; 3 – блок управления регулятором; 4 – переливной желоб.

Большинство математических описаний процесса фильтрования через зернистый слой сделано для случая постоянной скорости [5-8]. Связано это, по-видимому, с тем, что уравнения для переменной скорости намного более сложны, чем для случая $V=\text{const}$. Отсутствие надежных математических описаний фильтрования с переменной скоростью затрудняет выбор основных технологических параметров фильтров – крупности зерен, высоты слоя, скорости фильтрования, продолжительности фильтроцикла.

Таким образом, описание фильтрования с переменной скоростью является вполне актуальной задачей, представляющей интерес как с теоретической, так и с практической точек зрения.

Основные уравнения для процесса фильтрования через зернистый слой приведены ниже (часть из них – в виде функционалов). Уравнение баланса частиц взвеси в воде и в задержанном осадке –

$$F_1(C(x,t), \rho(x,t), m(x,t), V(t)) = 0. \quad (1)$$

Здесь $C=C(x,t)$ – концентрация взвешенных веществ в воде; $\rho=\rho(x,t)$ – концентрация осадка в загрузке; x, t – пространственная и временная координаты; $V(t)$ – скорость фильтрования; $m(x,t)$ – пористость загрузки.

Уравнение кинетики –

$$F_2(C(x,t), \rho(x,t), V(x,t), a, b) = 0, \quad (2)$$

где b, a – коэффициенты кинетики, определяющие соответственно

интенсивность прилипания и отрыва взвешенных частиц от поверхности загрузки (или от ранее прилипших частиц).

Пористость загрузки изменяется по глубине слоя и во времени –

$$m(x, t) = m_0 - \frac{\rho(x, t)}{\gamma}, \quad (3)$$

где γ – массовая концентрация твердых частиц в единице объема осадка.

Уравнения (1)-(3) определяют динамику осветления воды зернистым слоем. Гидродинамический блок задачи определяется уравнениями:

потеря напора в слое –

$$h_c(t) = \int_0^L I(x, t) dx; \quad (4)$$

гидравлический уклон –

$$I(x, t) = F_3(V(t), m(x, t), v, d_3), \quad (5)$$

где L – высота слоя загрузки, см; V – скорость фильтрования, см/с; v – коэффициент кинетической вязкости воды, см²/с; d_3 – эквивалентный диаметр зерен, см.

При увеличении потери напора в загрузке растет уровень воды в фильтре H , снижается подача воды в фильтр V_1 и падает скорость фильтрования V (рис.2).

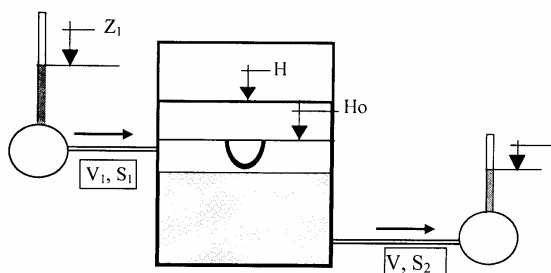


Рис.2 – Расчетная схема фильтра:

Z_1 и Z_2 – пьезометрические отметки в коллекторе подачи исходной воды и сбора фильтрата; H – отметка уровня воды в фильтре (H_0 – отметка уровня в начале фильтрования); S_1 – сопротивление коммуникаций, подводящих воду в фильтр; S_2 – сопротивление коммуникаций фильтрата (в том числе и дренажа); V_1 – расход воды, поступающей в фильтр на единицу его площади, V – скорость фильтрования.

Уравнение баланса поступающей и отводимой из фильтра воды –

$$V_1 - V = \frac{dH(t)}{dt}. \quad (6)$$

Величина V_1 определяется из условия квадратичной зависимости потерь напора от скорости, т.е. $h=SV^2$, откуда

$$V_1 = [(Z_1 - H)/S_1]^{0.5}. \quad (7)$$

Уровень воды в фильтре равен-

$$H = Z_2 + h_c(t) + S_2 V^2. \quad (8)$$

Начальные и граничные условия следующие:

$$\left. \begin{array}{l} x=0 \quad C=C_0 \\ t=0 \quad \rho_0 = \rho_0(x), V = V_0, H = H_0, m = m_0 \\ t \rightarrow \infty, \quad \frac{\partial C}{\partial x} = 0, C = C_0, \rho, \rho_{np} \end{array} \right\} \quad (9)$$

где ρ_{np} – предельная насыщенность порового пространства задержанной взвесью.

Последнее граничное условие означает, что при большой продолжительности фильтрования слой «зарабатывается» и перестает осветлять воду. Естественно, вначале это происходит в первых по ходу воды слоях загрузки.

Система дифференциальных, интегральных и алгебраических уравнений (1)-(8) с начальными и граничными условиями (9) является математической моделью работы скорого фильтра с переменной скоростью фильтрования. В этой системе 8 неизвестных – $C(x,t)$, $\rho(x,t)$, $m(x,t)$, $I(x,t)$, $h_c(t)$, $V_1(t)$, $V(t)$, $H(t)$, что соответствует числу уравнений. Следовательно, система уравнений замкнута и, в принципе, разрешима. Однако сложность этой системы не дает оснований надеяться на получение аналитических решений. Естественный выход - использование численных методов.

Уравнения (1)-(2) были представлены в конечно-разностной форме, в результате чего, после некоторых очевидных упрощений, при использовании уравнения кинетики по [5], имеем:

$$\frac{\Delta \rho}{\Delta t} = -V \frac{\Delta C}{\Delta x}, \quad (1')$$

$$\frac{\Delta C}{\Delta x} = -bC + \frac{a}{V} \rho. \quad (2')$$

Из (1') и (2') получаем рекуррентные соотношения для расчета ρ и C :

$$\rho_{i,j+1} = \rho_{ij} - V_{j+1} \frac{\Delta t}{\Delta x} (C_{i-1,j} - C_{ij}), \quad (10)$$

$$C_{i+1,j} = C_{ij} + \Delta x (-b C_{ij} + \frac{a}{V_j} \rho_{ij}), \quad (11)$$

где Δx и Δt – шаг счета по глубине слоя и во времени; i – номер слоя по глубине; j – номер «временного» слоя.

Потеря напора в слое, исходя из уравнения (5), равна

$$h_c = \Delta x \sum_0^L I(x, t). \quad (12)$$

Изменение уровня воды в фильтре рассчитывается по соотношению –

$$V_1 - V = \frac{\Delta H(t)}{\Delta t},$$

откуда

$$H_{j+1} = H_j + \Delta t (V_{1j} - V_j). \quad (13)$$

Подача воды в фильтр и скорость фильтрования определяются по формулам, следующим из (7) и (8):

$$V_{1j} = [(Z_1 - H_j) / S_1]^{0.5}; \quad (14)$$

$$V_{j+1} = \sqrt{(H_j - Z_2 - h_{cj}) / S_2}. \quad (15)$$

Потеря напора в элементарном слое толщиной Δx равна –

$$h_{ij} = \Delta x F_3(V_j, m_{ij}). \quad (16)$$

Разработан алгоритм расчетов полученной модели, который был предварительно успешно апробирован на задаче фильтрования с постоянной скоростью[9]:

1. Задают исходные данные – C_o , C_ϕ , L_o , Δx , Δt , $\rho_o(x)$, d_s , t_s , a , b , m_o , γ , Z_1 , Z_2 , H_0 .
2. Вычисляют V_{10} и V_0 .
3. Принимают $t=0$ и производят послойный расчет $\rho(x,0)$, $C(x,0)$, $m(x,0)$, $h(x,0)$ до значения $x=L$.
4. Находят суммарную потерю напора в загрузке фильтра $h_c(0)$.
5. Переходят к следующему моменту времени $t_{j+1}=t_j+\Delta t$, для которого последовательно определяют новые значения H , V_1 , V и V_n .
6. При найденном значении скорости фильтрования V проводят послойный расчет ρ , C , m , h .
7. Расчеты повторяют до достижения заданной величины продолжительности фильтрования (обычно не более 48 ч).

Описанный алгоритм был реализован с помощью программы Microsoft Excel с использованием макросов. Произведен ряд расчетов, показавших полное соответствие их результатов физическим представлениям о процессах, происходящих при фильтровании с падающей скоростью. В качестве примера на рис.3 показана динамика изменения скорости фильтрования, потерь напора в загрузке и уровня воды в фильтре. Здесь видно, что в начале фильтрования уровень воды в фильтре и потери напора в загрузке быстро возрастают, а затем прирост их замедляется. Скорость фильтрования также быстро растет, а затем, достигнув максимума, медленно убывает. Объясняется это тем, что вначале отметка уровня в фильтре низкая (она соответствует отметке кромки желобов). Поэтому скорость подачи воды в фильтр большая (перепад $Z_1 - H_0$ большой), скорость фильтрования низкая, в результате чего фильтр быстро наполняется.

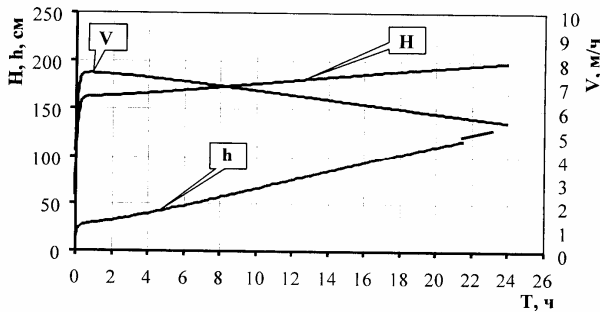


Рис.3 – Динамика фильтрования

Итак, получена математическая модель скорого фильтра, работающего с падающей скоростью, и разработан алгоритм численной реализации модели. Выполнены расчеты, показавшие полное соответствие их результатов физическим представлениям о процессах фильтрования с падающей скоростью.

Основными задачами дальнейших исследований являются:

- изучение влияния технологических параметров (начальной скорости, высоты слоя, крупности зерен и т.п.), а также кинетических коэффициентов на динамику фильтрования с переменной скоростью;
- экспериментальная апробация полученной математической модели.

1.Клячко В.А., Апельцин И.Э. Очистка природных вод. – М.: Стройиздат, 1971. – 579 с.

2.Hudson H.E. Declining rate filtration // JAWWA. Vol.51, №11,1959. – p. 42-50.

3.Cleasby J.L. Water filtration through deep granular media // Public Works, №6, 1970. – p.36-45.

4.Сысоев М.Н., Казакова Л.П., Богданова С.И., Круглов Л.С. Работа фильтрующих сооружений с переменной скоростью // Водоснабжение и санитарная техника. – 1968. – №2. – С.15-19.

5.Минц Д. М. Теоретические основы технологии очистки воды. – М.: Стройиздат, 1964. – 156 с.

6.Венецианов Е. В., Рубинштейн Р. Н. Динамика сорбции из жидких сред. – М.: Наука, 1983. – 237 с.

7.Олейник А. Я., Тугай А. М. Моделирование процессов кольматажа и суффозии в прифильтровой зоне скважины // Докл. НАН Украины. – 2001. – №9. – С.190 – 194.

8.Поляков В. Л. О фильтрации суспензий при заданном напоре // Докл. НАН Украины. – 2005. – №4. – С.48-54.

9.Грабовський П. О., Гурінчик Н.О. Чисельна реалізація математичної моделі фільтрування // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки: Наук.-техн. зб. Вип.6. – К., 2005. – С.4-13.

Получено 27.09.2006

УДК 504.062 : 574

С.А.КУЗИН

Ассоциация «Центр управления промышленными отходами», г.Харьков

ОТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА К ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ВОДООХРАННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

Обосновывается необходимость и описываются возможности применения программы моделирования поверхностного стока.

В последние годы, на фоне усиливающихся процессов урбанизации, возрастает важность вопроса охраны поверхностных вод от загрязнения ливневым стоком с городских территорий. Учет объемов поверхностных сточных вод – важнейший фактор улучшения экологического состояния водоемов. Охрана поверхностных водных объектов и их экологическая безопасность определяются не только качеством очищенных сточных вод, сбрасываемых в водоприемники после городских очистных сооружений, но и качеством поверхностных вод, поступающих в них по системам закрытой и открытой дождевой канализации [1].

Попадание поверхностного стока в водные объекты вызывает целый ряд проблем, приводящих к нарушению целостности водного объекта. Это и вопросы превышения предельно допустимых концентраций химических веществ в водном объекте, и загрязнение придонного слоя, приводящее к острому и хроническому токсическим воздействиям на обитателей водоемов, и проблема эрозии каналов, возникающая в результате большой интенсивности потока поверхностных сточных вод [2].